



KEMIJA U NASTAVI

Uređuje: Nenad Raos

Stereokemija na drugi način:
puževi, zrcala, koordinatni sustavi

K. Molčanov*

Institut Ruđer Bošković, Bijenička 54, 10 000 Zagreb

DOI: 10.15255/KUI.2018.040

KUI-5/2019

Stručni rad

Prispjelo 3. rujna 2018.

Prihvaćeno 5. prosinca 2018.

Ovo djelo je dano na korištenje pod
Creative Commons Attribution 4.0
International License

Sažetak

U ovome se članku prikazuje sustavan pristup stereokemiji te tumačenju njezina središnjeg pojma, kiralnosti, jednostavnijim načinom koji se može prilagoditi nastavi kroz eksperimente. Polazeći od predmeta iz svakodnevne uporabe (cipele, zrcala, puževi, itd.), dolazi se do općeg opisa kiralnosti, iz kojega se onda izvodi molekulska kiralnost. Tetraedarski se ugljikov atom može smatrati specijalnim slučajem, koji se može izvesti naknadno.

Ključne riječi

Stereokemija, kiralnost, nastava kemije, apsolutne konfiguracije

1. Uvod

Stereokemija je središnji pojam organske kemije i biokemije, a također i znanosti o (organskim) materijalima te farmacije. Nemoguće je razumijevanje bioloških procesa na razini molekula bez znanja stereokemije; to pak za sobom povlači da je stereokemija nužna i za razumijevanje funkcije lijekova te za njihov dizajn.¹

Na žalost, gradivo stereokemije je manjkavo i loše riješeno, kako na fakultetima tako i u srednjim školama. Posljedica toga je nerazumijevanje te oskudno i fragmentirano znanje. Naročito je problematično neshvaćanje temeljnog pojma, kiralnosti; iz toga pak slijedi neshvaćanje svega ostalog.

U nastavi stereokemije pojam se kiralnosti uglavnom veže uz povijesni Pasteurov pokus razdvajanja enantiomera vinske kiseline, te se zatim prelazi na Fischerove *relativne* konfiguracije (L, D) i Cahn-Ingold-Prelogove *apsolutne* konfiguracije (R, S). Uglavnom se naglasak stavlja na točno asigniranje konfiguracija R i S asimetrično supstituiranoga ugljikova atoma, te studenti stječu pogrešan dojam da je upravo ta asignacija fundamentalna stvar. Takvim učenjem studenti (budući kemičari, farmaceuti itd.) uglavnom ne uspijevaju shvatiti pojam kiralnosti, pa redovito imaju problema s razumijevanjem stereokemije. Daljnju zbrku stvara mnoštvo kojekakvih asignacija, uglavnom smišljenih *ad hoc* za određene specijalne slučajeve: L/D, R/S, M/P, A/C, Λ/Δ , λ/δ , itd...

U ovome članku predlažem drugačiji način uvođenja i objašnjavanja koncepta kiralnosti, bez nepotrebnog ograničavanja samo na neke aspekte (poput tetraedarskog ugljikova atoma). Budući da je riječ o općoj i široko rasprostranjenoj pojavi,^{2,3,4} trebalo bi krenuti od najopćenitijeg opisa, pa se zatim detaljnije pozabaviti specijalnim slučajevima zanimljivima u kemiji. Asignacija konfiguracije tek je sporedna stvar, koju se može naučiti i naknadno, pa joj ne bi trebalo pridavati veliku važnost.

Iako je Pasteurov pokus zanimljiv za povijest kemije,^{1,2,5,6} vinska kiselina teško se može nazvati prototipom kiralnog spoja te nije osobito pogodna za objašnjavanje koncepta kiralnosti. Da bismo objasnili molekulska kiralnost, trebalo bi najprije krenuti od kiralnih predmeta u svakodnevnoj uporabi, a zatim prijeći na najjednostavnije kiralne molekule.

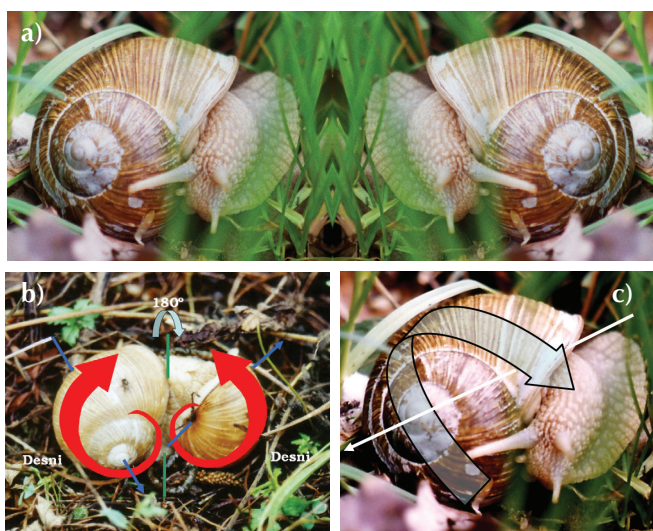
2. Kiralnost u prirodi

Da bismo opazili kiralnost u prirodi, ili pak u svakodnevnom životu, ne trebamo ići daleko. Dovoljno je izaći u vrt poslije kiše i malo bolje pogledati po travi i ispod lišća – sigurno ćemo naći nekog puža. Puževe se kućice ne mogu preklopiti sa svojom zrcalnom slikom (slika 1a), dakle kiralne su. Budući da su sve zavijene na istu stranu (slika 1b), možemo reći da su *homokiralne*.

Ako definiramo smjer osi oko koje je kućica zavijena, možemo definirati i smjer zavijanja ili *konfiguraciju* kućice (slika 1c). Kućice kopnenih puževa mahom su zavijene

* Dr. sc. Krešimir Molčanov
e-pošta: kmolcano@irb.hr

udesno. Razmotrimo li sliku 1a, vidimo da konfiguraciju (tj. smjer zavijanja) možemo obrnuti zrcaljenjem: kućica puža-slike u zrcalu je zavijena ulijevo. Ako bismo u prirodi našli puža s kućicom zavijenom ulijevo, on bi izgledao kao zrcalna slika “normalnog” (“desnog”) puža, tj. imao bi suprotnu konfiguraciju. Prema tome, “desni” i “lijevi” puž čine par *enantiomera*. Rotacijom oko neke osi konfiguracija kućice se ne mijenja (na slici 1b kućice su međusobno zarotirane za 180° i obje su zavijene udesno); također se ne mijenja niti translacijom u prostoru (u to se lako uvjerimo promatrajući puža kako se kreće kroz prostor poslovičnom puževom brzinom).



Slika 1 – a) Puž pred zrcalom: kućice puža (lijevo) i njegove zrcalne slike (desno) tvore par enantiomera; b) dva puža vinogradnjaka (*Helix pomatia*) in flagranti: iako su međusobno zaokrenute za 180° , obje su kućice zavijene udesno; c) definicija smjera zakretanja (u desno) puževe kućice

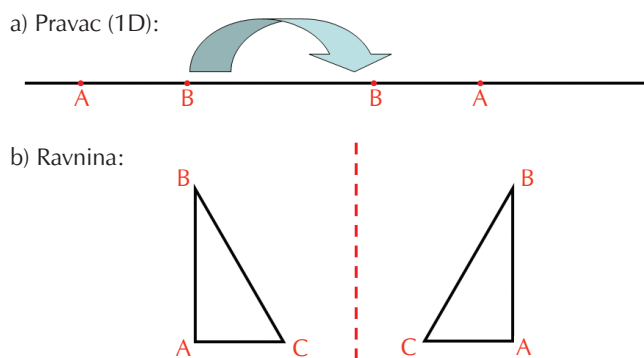
Fig. 1 – a) A snail's shell (left) and its mirror image (right) are a pair of enantiomers; b) a pair of Roman snails (*Helix pomatia*) in an act of procreation: although their shells are mutually rotated by 180° , they are both right-handed; c) definition of right-handedness of a snail's shell

Osim puževa, kiralne predmete nalazimo u svakom pred-soblju: cipele i rukavice. Stavimo li desnu cipelu pred zrcalo, u zrcalu ćemo vidjeti lijevu cipelu! Ista stvar vrijedi i za rukavice; njih k tome možemo *izvrtati* ili *invertirati*. Izvnmemo li lijevu rukavicu, pretvorit ćemo je u desnu. Dakle, konfiguraciju kiralnog predmeta možemo obrnuti na dva načina: zrcaljenjem ili inverzijom. Zrcaljenje i inverzija su dakle dvije *simetrijske operacije* koje obrću kiralnost. Translacija i rotacija oko osi su *simetrijske operacije* koje ne obrću kiralnost.

Za razliku od puževa, ljudi su *akiralni*: u zrcalu vidimo sebe, a ne nekakvo naopako biće. Ljudsko tijelo je, barem približno, zrcalno simetrično: lijeva polovica tijela je zrcalna slika desne. Možemo zamisliti da sredinom ljudskoga tijela prolazi *zrcalna ravnina*. Velika većina životinja također je (približno) zrcalno simetrična (puževi predstavljaju rijetku iznimku), pa je prema tome i akiralna.

3. Kako definirati kiralnost?

Nakon što smo intuitivno shvatili što je to kiralnost, možemo se pozabaviti njezinom preciznijom definicijom. Naš je poznati nobelovac Vladimir Prelog kiralan predmet definirao kao onaj koji se “*se ne može preklopiti sa svojom zrcalnom slikom operacijama translacije i rotacije*”.³ No pozabavimo se najprije najjednostavnijim mogućim slučajem: kako izgleda kiralan predmet u jednodimenzionalnom prostoru (tj. na pravcu)? Svaki je vektor, tj. dužina s definiranim smjerom, kiralan u 1D prostoru (slika 2a). Da bismo obrnuli smjer dužine AB sa slike 2a, trebamo je “izvadi” izvan pravca, što znači treba nam barem još jedna dimenzija. U ravnini (2D prostoru) dužinu možemo okretati kako nam odgovara, ali trokut ABC sa slike 2b ne možemo zakretanjem prevesti u trokut BAC. Da bismo ga “izvnmuli”, trebamo ga “izvadi” iz ravnine i zakrenuti u trodimenzionalnom prostoru.



Slika 2 – Najjednostavniji kiralni predmet u a) jednoj dimenziji je dužina (definirana dvjema točkama), b) u dvije dimenzije je raznostraničan trokut (definiran trima točkama)

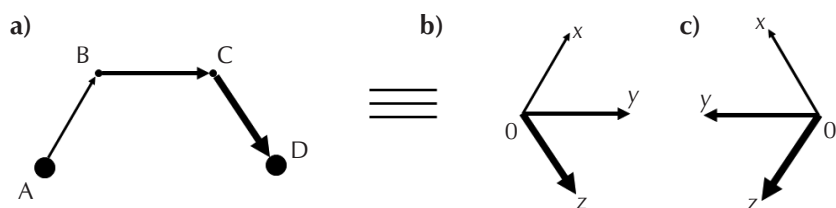
Fig. 2 – The simplest chiral object in a) one dimensional space is a length (defined by two points), b) in two-dimensional space it is a triangle (defined by three points)

Analogno, tijelo s četiri vrha (npr. nepravilni tetraedar) u 3D prostoru također ne možemo izvnmuti nikakvim zakretanjem, ali to bismo mogli učiniti u 4D prostoru. Na žalost, četvrtu je dimenziju teško i zamisliti, a kamoli prikazati na papiru...

Kako dakle izgleda najmanji kiralni predmet? U 1D prostoru definiramo ga dvjema točkama, u 2D prostoru trima točkama, a u 3D prostoru četirima točkama – dakle, za definirati najjednostavniji kiralni predmet u n -dimenzionalnom prostoru treba nam $n + 1$ točka.

Mora li najjednostavniji kiralni predmet biti geometrijski lik ili tijelo? Trima točkama definiramo koordinatni sustav u ravnini, a četirima točkama u 3D prostoru. Prema tome, i koordinatni sustav je također kiralan: možemo definirati lijevi i desni (slika 3).

Prema definiciji, u prirodoslovlju i tehnici uvijek se upotrebljava desni koordinatni sustav (za njegov odabir možemo se poslužiti “pravilom desne ruke”); uporaba naopakog koordinatnog sustava može izazvati veliku zbrku. Zamislamo



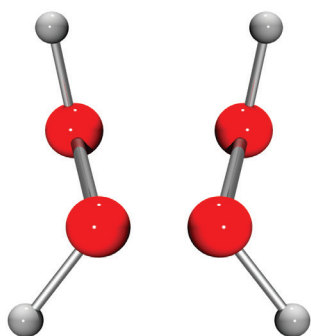
Slika 3 – a) Najjednostavniji kiralni predmet u 3D prostoru definiran je četirima točkama. b) Točke A, B, C i D povežujemo trima vektorima koji razapinju koordinatni sustav. c) Lijevi koordinatni sustav je zrcalna slika desnoga.

Fig. 3 – a) The simplest chiral object in 3D space is defined by four points. b) Points A, B, C and D are connected by three vectors spanning a coordinate system. c) Left-handed coordinate system is a mirror image of the right-handed coordinate system.

samo da krenemo graditi kuću prema nacrtu načinjenom u lijevom koordinatnom sustavu: pobrkali bismo lijevu i desnu stranu, pa bi kuća ispala naopaka!

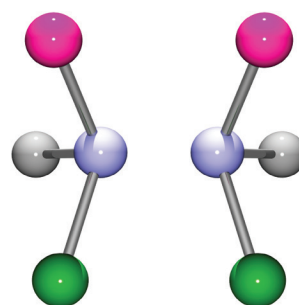
4. Kiralne molekule

Kako bi onda mogla izgledati najjednostavnija kiralna molekula? Iz gornje rasprave jasno nam je da mora imati najmanje četiri atoma koji ne leže u istoj ravnini (planarne su molekule akiralne). Prvi takav spoj koji bi nam pao na pamet je vodikov peroksid. Zaista, molekula H_2O_2 je u svome osnovnom stanju kiralna (slika 4), tj. ima dva enantiomerna konformera iste energije. Doduše, ne možemo nikako odvojiti “lijevi” vodikov peroksid od “desnoga” jer je energijska barijera za intramolekulsku rotaciju oko središnje veze O–O toliko niska da molekule pri sobnoj temperaturi (i svim niskim temperaturama koje se u praksi mogu postići) cijelo vrijeme prelaze iz “lijevog” konformera u “desni”. U uzorku vodikova peroksida u svakome trenutku zato imamo jednak broj “lijevih” i “desnih” molekula.



Slika 4 – Dva enantiomerna konformera vodikova peroksida
Fig. 4 – Two enantiomeric conformers of hydrogen peroxide

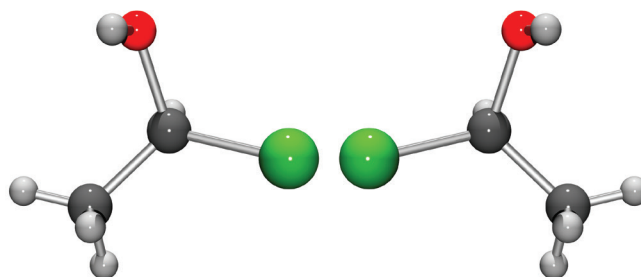
Sljedeći primjer jednostavnog kiralnog spoja mogao bi biti neki tercijarni amin s tri različita atoma vezana na središnji dušik, recimo fluorkloramin (slika 5). Taj spoj također ima dva enantiomerna konformera (slika 5), ali se molekula može “izvrtati” poput kišobrana, tako da pri sobnoj temperaturi također postoji ravnoteža između dvaju enantiomera, slično kao i kod vodikova peroksida.



Slika 5 – Dva enantiomerna konformera fluorkloramina
Fig. 5 – Two enantiomeric conformers of fluorochloroamine

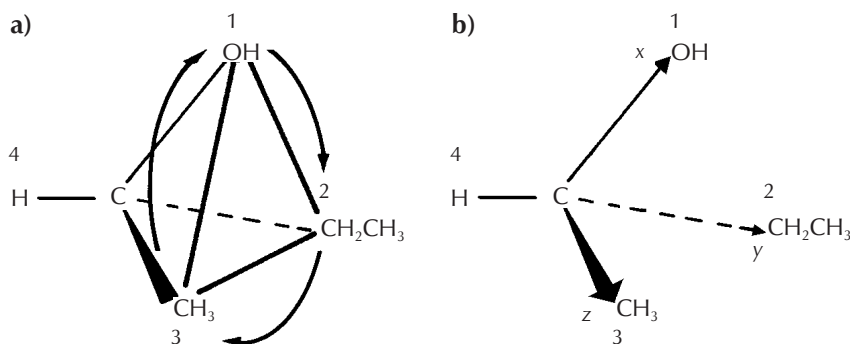
Tercijarni se amin može “ukrutiti” tako da ga se protonira, tj. prevede u kvaternarni amonijev kation (kod kojega je okruženje središnjeg dušikova atoma tetraedarsko). Taj dodatni vodikov atom onemogućava izvrtanje konfiguracije (energijska je barijera viša od energije potrebne za disocijaciju molekule) tako da bismo u načelu mogli odvojiti dva stabilna enantiomera.

I sada konačno dolazimo do tetraedarskoga ugljikova atoma. Njegova je konfiguracija također kruta pa, ako su sva četiri supstituenta vezana na njega različita, spoj je kiralan. Središnji atom nazivamo *stereogenim centrom*. Jedan jednostavan primjer kiralnoga organskog spoja je kloretnol (slika 6).



Slika 6 – Dva enantiomera kloretnola: S-kloretnol (lijevo) i R-kloretnol (desno)

Fig. 6 – Two enantiomers of chloroethanol: S-chloroethanol (left) and R-chloroethanol (right)



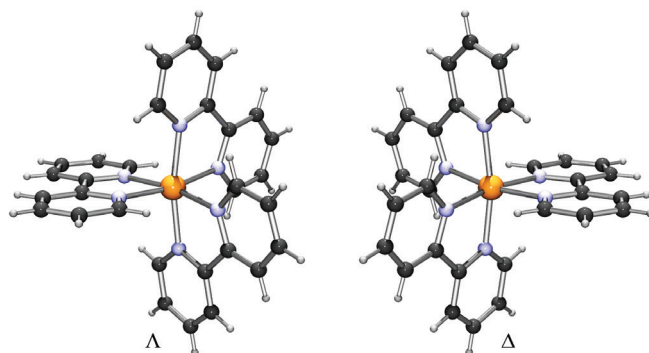
Slika 7 – a) Cahn-Ingold-Prelogova (CIP) konvencija za definiranje apsolutnih konfiguracija na tetraedarskim atomima. b) Tri supstituenta na tetraedarski koordiniranom atomu razapinju lijevi ili desni koordinatni sustav.

Fig. 7 – a) Cahn-Ingold-Prelog (CIP) convention for defining absolute configurations of tetrahedrally coordinated atoms. b) Three substituents on the tetrahedrally coordinated atom define either a left- or right-handed coordinate system.

Sada kada smo konačno došli do stabilnoga kiralnog spoja, nameće nam se pitanje kako definirati koji je spoj “lijevi”, a koji “desni”. Preporuka IUPAC-a je primjena Cahn-Ingold-Prelogovih pravila (CIP):^{7,8} supstituentima se dodijeli *prioritet* prema težini atoma, tako da prioritet 1 ima klor, prioritet 2 ima hidroksilna skupina (tj. kisik), prioritet 3 ima metilna skupina (tj. ugljik), a najniži prioritet, 4, ima vodikov atom. Molekula se zatim orijentira tako da gledamo od središnjega ugljikova atoma prema supstituentu s najnižim prioritetom (slika 7a), pa opisujemo krug kroz preostala tri supstituenta, i to redom 1-2-3. Krećemo li se pri tome ulijevo, konfiguraciju molekule označavamo s *S*, a ako se krećemo udesno, onda s *R* (slika 7a). Ukoliko u molekuli imamo više asimetrično supstituiranih atoma, na taj način možemo svakome pripisati odgovarajuću konfiguraciju. Tako je npr. konfiguracija prirodne vinske kiseline 2*S*,3*S*, a glukoze 2*R*,3*S*,4*R*,5*R*.

Analogan rezultat dobit ćemo ako definiramo koordinatni sustav molekule tako da u ishodište stavimo središnji ugljikov atom, a osi *x*, *y* i *z* definiramo supstituentima s prioritetima 1, 2 i 3 (slika 7b). Molekula *S* tako razapinje lijevi, a *R* desni koordinatni sustav.

koji su raspoređeni tako da su usmjereni prema vrhovima oktaedra; takvo okruženje nazivamo *oktaedarskim*. Ukoliko ligande možemo razlikovati, možemo definirati dvije konfiguracije koje označavamo kao Λ i Δ (slika 8).



Slika 8 – Enantiomeri tris(bipiridino)bakra(II): Λ (lijevo) i Δ (desno)

Fig. 8 – Enantiomers of tris(bipyridino)copper(II): Λ (left) and Δ (right)

5. Vrste kiralnosti

5.1. Stereogeni centar

Iako je u prirodi najčešći, a iz praktičnih nam razloga i najvažniji, asimetrično supstituirani ugljikov atom je tek jedan specijalan slučaj među mnogobrojnim uzročnicima molekulske kiralnosti. Svaki atom okružen s četirima ili više supstituenata (koji ne leže u istoj ravnini!) ponaša se kao stereogeni centar. Pored ugljika, stereogeni centar može biti i dušik (u kvaternarnim amonijevim kationima), silicij, fosfor, sumpor, arsen... ili pak neki metalni atom. Za svaki atom tetraedarskoga okruženja možemo rabiti CIP-oznake, ali što je s onima koji su okruženi s više od četiri atoma?

U kemiji koordinacijskih spojeva najčešći tip su spojevi kod kojih je šest liganada vezano na središnji metalni atom i

5.2 Kiralne molekule bez stereogenog centra

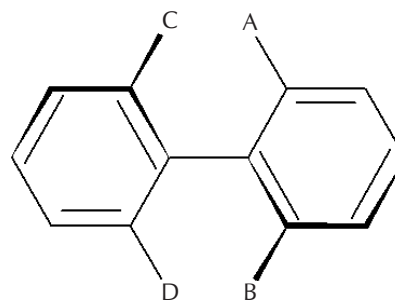
Stereogeni se centar ne treba uvijek poklapati s nekim atomom. Ukoliko imamo molekulu s četiri različite skupine (ili više njih) koje ne leže u istoj ravnini, lako se možemo uvjeriti da je ona kiralna. Problem je kako definirati takvu kiralnost. Kod nekih su spojeva supstituenti razmješteni asimetrično s obzirom na neku os (koja se obično poklapa s nekom osi simetrije ili pak kemijskom vezom), pa se za njih rabi izraz *osna kiralnost* (engl. *axial chirality*); kod nekih su drugih pak spojeva supstituenti razmješteni asimetrično s obzirom na neku ravninu, pa se tu rabi izraz *ravninska kiralnost* (engl. *planar chirality*). Preporuke IUPAC-a za pripisivanje konfiguracija *R* i *S* ovdje se pretvaraju u zbrku propisâ koja bi zbunila i pravnika, pa kako ne bi kemičara?! Očito, definiranje kiralnosti na molekulama bez stereogenog centra još nije riješeno.

Kod bifenilâ i sličnih spojeva (slika 9) rotaciju oko središnje veze C–C onemogućavaju supstituenti, koji su preveliki da bi jedan prsten mogao slobodno rotirati u odnosu na drugi. Takva se pojava naziva *atropoizomerija*, te bifenile smatramo osno kiralnima: možemo zamisliti da se stereogeni centar nalazi na polovištu veze C–C između dvaju fenilnih prstenova, tako da supstituenti tvore jako razvučeni tetraedar (slika 9). Sada možemo primijeniti CIP-pravila i spoju pripisati konfiguraciju *R* ili *S*.

Na sličan se način mogu definirati konfiguracije mnogih "osno kiralnih" spojeva, na primjer 3-acetil-1,3-bis-(2-klor-4-nitrofenil)-1*E*-triazena (slika 10).⁹

Već smo rekli da se kiralnost ne obrće rotacijom oko neke osi. Prema tome, kiralne molekule mogu imati osi simetrije; dapače, mogu imati i više njih. Jedan je takav primjer tris(bipiridin)bakar(II) prikazan na slici 8, koji ima tri međusobno okomite osi drugog reda (točkina mu je grupa D_{2h}). Poznati su kiralni organski spojevi još viših simetrija (neki imaju i osi četvrtoga reda!); neki primjeri su prikazani na slici 11.

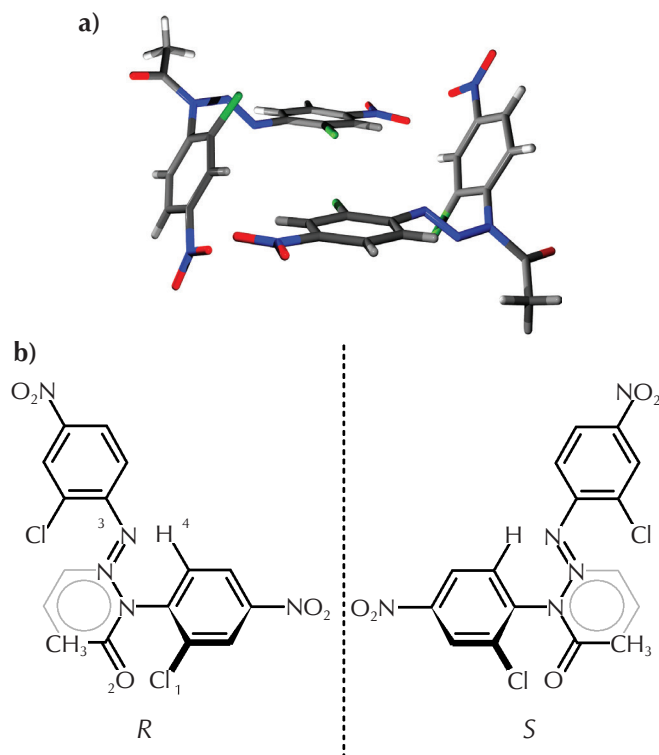
Velike organske molekule i biološke makromolekule (proteini, RNA i DNA) često su *helične*. Heličnost je vrsta kiralnosti kakvu smo već opazili na puževim kućicama i vijcima. Za opis helične kiralnosti zavojnice rabe se oznake *M* i *P* (od minus i plus), koje su prikazane na slici 12.



Slika 9 – Kiralnom bifenilu sa supstutentima A, B, C i D mogu se pripisati konfiguracije *R* i *S* prema CIP-pravilima ako zamislimo da se stereogeni centar nalazi na polovištu središnje veze C–C. Tada supstituenti A, B, C i D tvore razvučeni tetraedar.

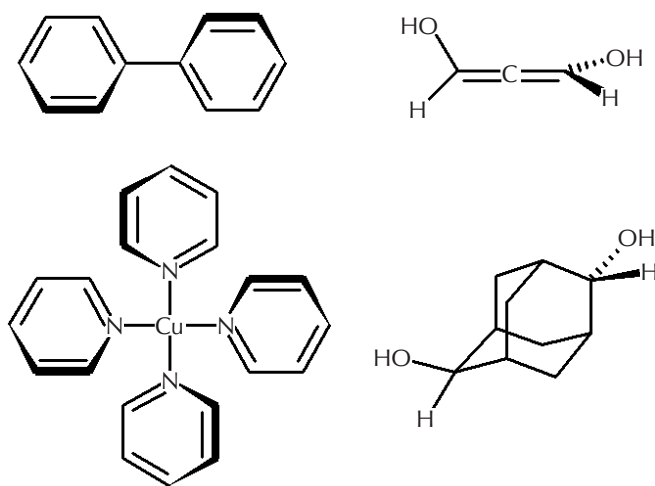
Fig. 9 – Chirality of an asymmetrically substituted biphenyl can be designated using CIP-rules if we assume that the stereogenic centre is located on the midpoint of the central C–C bond. Substituents A, B, C and D are arranged like an extended tetrahedron.

Biološke su makromolekule zapravo polimeri koji se sastoje od kiralnih podjedinica: svaki nukleotid u dobro nam poznatoj zavojnici DNA ima u sebi kiralnu molekulu deoksiriboze, čija je apsolutna konfiguracija po CIP-pravilima

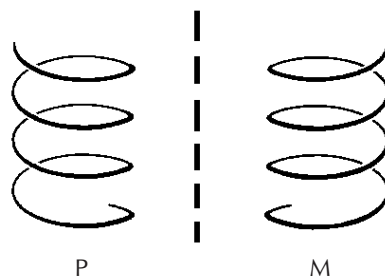


Slika 10 – Kiralnost 3-acetil-1,3-bis(2-klor-4-nitrofenil)-1*E*-triazena: a) u kristalnom pakiranju dvije enantiomerne molekule su povezane centrom inverzije, b) asignacija apsolutne konfiguracije prema CIP-pravilima.

Fig. 10 – Chirality of 3-acetyl-1,3-bis(2-chloro-4-nitrophenyl)-1*E*-triazene: a) two enantiomeric molecules in the crystal packing are related by inversion; b) assignation of absolute configurations according to CIP-rules.



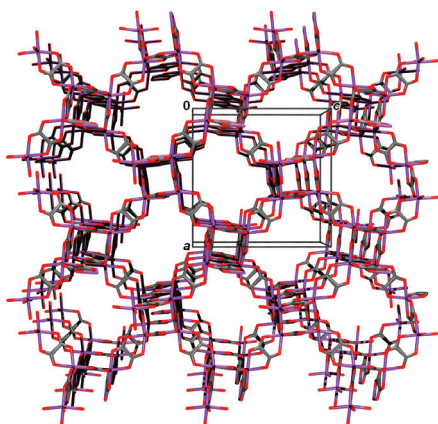
Slika 11 – Neki primjeri kiralnih molekula visoke simetrije
Fig. 11 – A few examples of highly symmetric chiral molecules



Slika 12 – Definicija konfiguracija *P* i *M* za zavojnice
Fig. 12 – Definition of *P* and *M* configurations of helices

2S,3S,4S,5R; čitava je dvostruka zavojnica svijena tako da joj je heličnost *P*.

Heličnost ne mora nužno biti ograničena samo na jednu dimenziju. U metal-organskoj rešetki $\{[\text{Cu}(\text{bpy})_3][\text{Mn}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3]\cdot\text{H}_2\text{O}\}_n$ (slika 13)¹⁰ imamo kiralnu 3D mrežu koju tvore manganovi atomi premošćeni oksalatnim anionima: konfiguracija svakog manganova atoma je Λ , a čitava mreža ima heličnost *P*. Enantiomerna struktura ima konfiguraciju mangana Δ , a čitave mreže *M*.



Slika 13 – Kiralna 3D mreža sastavljena od manganovih(II) kationa premošćenih oksalatnim anionima u $\{[\text{Cu}(\text{bpy})_3][\text{Mn}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3]\cdot\text{H}_2\text{O}\}_n$. Konfiguracija mreže je *P*, a manganovih kationa Λ .

Fig. 13 – Chiral 3D network comprising manganese(II) cations bridged by oxalate anions in $\{[\text{Cu}(\text{bpy})_3][\text{Mn}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3]\cdot\text{H}_2\text{O}\}_n$. Configuration of the network is *P* and that of Mn(II) cations is Λ .

6. Kako prikazivati kiralne spojeve?

U podučavanju stereokemije velik problem predstavlja prikazivanje molekula. Kiralnost je, naime, trodimenzionalna pojava, koju nekako trebamo prenijeti na dvodimenzionalnu površinu (papir ili ploču). Klinaste i Fischerove projekcijske formule predstavljaju dva više-manje uspješna pokušaja. Na žalost, iako su korisne iskusnom kemičaru, učenicima koji se s njima sreću prvi put nerijetko su velik problem.

Danas se možemo poslužiti računalima i 3D grafikom. Interaktivni su modeli, koje lako možemo načiniti nekim besplatno dostupnim programom, velik korak naprijed.

Ipak, najbolji prikaz kiralnih molekula je trodimenzionalni model, koji možemo načiniti od plastike (danas se mogu nabaviti vrlo praktični setovi plastičnih "atoma" i "veza" od kojih možemo sastavljati molekule), drvenih štapića i lopatica za ping-pong, stiropora, itd... uz malo mašte, imamo bezbroj mogućnosti. U svakom slučaju, okrećući modele u vlastitim rukama, učenici će sigurno brže i lakše shvatiti stereokemijske koncepte nego gledajući nespretne klinaste i Fischerove projekcije. Također, možemo učenicima

zadati neka sami sastave model neke jednostavne kiralne molekule (npr. kloretnola); možemo biti sigurni da će se među uradcima skupine učenika naći oba enantiomera.

Ukratko, u nastavi stereokemije trebalo bi se što je više moguće koristiti trodimenzionalnim modelima;¹¹ ploču i računalo najbolje bi bilo izbjegavati koliko je god moguće.

7. Zaključak

U nastavi stereokemije trebali bismo krenuti od bića i predmeta iz svakodnevne uporabe (cipele, vijci, cvijeće, puževi...), pa zatim iz toga izvesti pojam simetrije i kiralnosti. Molekulska kiralnost nužno slijedi iz ovoga. Asigniranje apsolutnih konfiguracija *R* i *S* nije važno za razumijevanje pojma kiralnosti, pa ne bi trebalo zauzimati toliko važno mjesto u nastavi stereokemije.

Za kraj, izradom trodimenzionalnih modela lako možemo razbiti odavno uvriježenu zabludu, koja se već desetljećima širi s katedri: Pasteurova meso-vinska kiselina nema zrcalnu ravninu, nego središte inverzije. Zrcalna se ravnina pojavljuje u Fischerovim projekcijskim formulama, ali u stvarnosti je nema!

ZAHVALE

Ovaj rad je financiralo Hrvatsko kemijsko društvo (projekt "e-škola kemije"). Zahvaljujem se dr. sc. Biserki Kojić-Prodić (zaslužna znanstvenica IRB-a), izv. prof. dr. sc. Nenadu Judašu (Kemijski odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu), doc. dr. sc. Vladimiru Stilinoviću (Kemijski odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu) i pokojnom prof. dr. sc. Petru Vrkljanu na pomoći i korisnim savjetima.

Literatura References

1. N. Raos, Deset kemijskih pokusa koji su promijenili svijet, Tehnički muzej i Konzor, Zagreb, 2000., str. 99–108.
2. D. Grdenić, Povijest kemije, Novi Liber i Školska knjiga, Zagreb, 2001., str. 691–706.
3. K. Molčanov, B. Kojić-Prodić, Kiralnost – u susret 160-toj obljetnici Pasteurova otkrića, Kem. Ind. 56 (2007) 275–292.
4. K. Molčanov, Dionizov dar iliti: o vinu, sriješu i (stereo)kemiji, Priroda 98 (8) (2008) 38–46.
5. K. Molčanov, V. Stilinović, Chemical Crystallography before X-ray Diffraction, Angew. Chem., Int. Ed. 53 (2014) 638–652, doi: <https://doi.org/10.1002/anie.201301319>.
6. K. Molčanov, V. Stilinović, Die Chemische Kristallographie vor der Röntgenbeugung, Angew. Chem. 126 (2014) 650–665, doi: <https://doi.org/10.1002/ange.201301319>.
7. R. S. Cahn, C. K. Ingold, V. Prelog, Specification of Molecular Chirality, Angewandte Chemie, Int. Ed. 5 (1966) 385–415, doi: <https://doi.org/10.1002/anie.196603851>.

8. IUPAC, Compendium of Chemical Terminology, 2nd Ed. (the "Gold Book") (1997). Online corrected version: (2006–) "Relative Configuration".
9. K. Molčanov, S. Polanc, M. Osmak, B. Kojić-Prodić, An axial chirality and disorder of positional isomers in a crystal of highly cytotoxic 3-acetyl-1,3-bis(2-chloro-4-nitrophenyl)-1*E*-triazene, *Acta Chim. Slov.* **62** (2015) 371–377, doi: <https://doi.org/10.17344/acsi.2015.1420>.
10. M. Jurić, D. Pajić, D. Žilić, B. Rakvin, K. Molčanov, J. Popović, Magnetic order in a novel 3D oxalate-based coordination polymer $\{[\text{Cu}(\text{bpy})_3][\text{Mn}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3]\cdot\text{H}_2\text{O}\}_n$, *Dalton Trans.* **44** (2015) 20626–20635, doi: <https://doi.org/10.1039/c5dt02933c>.
11. P. Kalinovčić, Molekulski modeli: izrada modela s magnetima, *Kem. Ind.* **64** (7-8) (2015) 399–402, doi: <https://doi.org/10.15255/KUI.2015.023>.

SUMMARY

A Different Introduction to Stereochemistry: Snails, Mirrors, and Coordinate Systems

Krešimir Molčanov

Chirality is the central concept of stereochemistry, but remains neglected at both high school and university levels. It is typically introduced through description of Pasteur's historic resolution of enantiomers of tartaric acid, and teaching is usually centred on correct assignation of configurations *R* and *S*. This "classical" approach rarely proceeds further, thus leaving serious gaps in the students' knowledge.

In this paper, new and systematic approach to the introduction of the concept of chirality, is described. We start with every-day objects (shoes, mirrors, snails, etc.), from which a generalised concept of chirality is introduced. Once this groundwork is laid, molecular chirality is deduced; its commonly occurring special cases (such as *R* and *S* configurations of the tetrahedral carbon atom) are discussed later. This method of teaching basic concepts of stereochemistry can be easily adopted to learning through experiments.

Keywords

Stereochemistry, chirality, teaching chemistry, absolute configurations

Ruđer Bošković Institute
Bijenička 54
10 000 Zagreb, Croatia

Professional paper
Received September 3, 2018
Accepted December 5, 2018